

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ КАПИЛЛЯРНЫХ ТРУБ

ULTRASONIC INSPECTION OF CAPILLARY TUDE

Серебряков Ан.В.¹, Буркин С.П.², Серебряков Ал.В.³, Марков А.Д.¹,

Ладыгин С.А.¹, Прилуков С.Б.¹, Мальцев В.В.¹

Россия, ОАО «Первоуральский новотрубный завод»¹, E-mail: Andrey.Serebryakov@chelpipe.ru Уральский
федеральный университет², E-mail: spb@mtf.ustu.ru,

ООО «Новые технологии труб»³, E-mail: ntt@pervouralsk.ru

On the basis of improving the design of the immersion bath significantly enhanced the technical capabilities of ultrasonic testing equipment. In particular, reliably determined by defects such as longitudinal cracks and mark, nonmetallic inclusions, scores and laps on the thin-walled tubes of small diameter (less than 5 mm). Shows how relatively simple technical means, using the physical properties of the contact liquid, improve monitoring of capillary tubes for flaw of traditional design, implement ultrasonic control immersion method of Lamb waves

При производстве труб малых размеров (<5 мм) из углеродистых и коррозионно-стойких сталей и сплавов по ГОСТ 14162-79, ТУ14-225-25-97 и ТУ14-3Р-1560-2009 до настоящего времени отсутствовала техническая возможность ультразвукового контроля (УЗК). Разработка методики и технологической оснастки для УЗК капиллярных труб обеспечивает гарантированный уровень качества и позволяет достичь конкурентного преимущества на рынке указанных труб.

Созданная на ОАО «ПНТЗ» и запатентованная (патенты РФ №2400740, 2400741, 2400742, 2410675, 2410676, 2410677) установка ультразвукового контроля труб малого диаметра позволяет осуществить контроль капиллярных труб по ГОСТ 17410 с использованием для настройки аппаратуры стандартных образцов с искусственными отражателями типа продольной симметричной треугольной риски с углом раскрытия $30\pm5^\circ$, нанесенной на наружную поверхность стандартного образца и имеющей глубину $10\pm1\%$ от номинальной толщины стенки и длину 5 ± 1 мм.

Несмотря на большое количество известных устройств для УЗК труб иммерсионным методом, ни одно из них не позволяет удовлетворительно центрировать достаточно тонкую трубу относительно акустических осей искателей.

Например, в работе [1] описано устройство УЗК иммерсионным методом, в котором ванна с контактной жидкостью имеет направляющие фланцы с эластичными уплотнениями для прохода трубы через ванну. В конструкции ванны отсутствуют какие-либо средства центрирования движущейся трубы относительно акустических осей искателей, что не позволяет осуществлять контроль труб сравнительно малого диаметра. Любая контролируемая труба имеет определенную остаточную кривизну и разностенность, даже находящиеся в допустимых по техническим условиям пределах. Эластичные уплотнительные устройства направляющих фланцев, расположенные достаточно далеко друг от друга и от искателей, не в состоянии устранить изгибы трубы, нарушающие центровку трубы относительно фиксированных акустических осей искателей. При формировании волн Лэмба в стенке тонкостенной трубы

акустическая ось искателя не может смещаться относительно оси трубы более $\frac{1}{4}$ диаметра трубы [2]. Даже идеально прямая труба (что технически не достижимо), но имеющая небольшую разностенность, при вращении отклоняется от оси за счет действия центробежных сил. Поэтому контроль труб диаметром менее 4,8 мм становится невозможным [2]. В конструкциях иммерсионных ванн, выполненных на уровне изобретения [3-7], используются механизмы центрирования трубы посредством роликов, прижимаемых к трубе либо гидроцилиндрами [4], либо пружинами [3, 5], либо пневмоцилиндрами с системой валов, рычагов и упоров [7], либо магнитными силами [6]. Общим конструктивным признаком этих механизмов является установка центрирующих роликов, прижатых с определенной силой к контролируемой трубе, а общим недостатком – образование винтового следа на наружной поверхности трубы за счет тангенциального трения скольжения между трубой и роликами. Ослабление прижима роликов недопустимо при контроле труб малого диаметра. Кроме того, небольшое биение роликов вызывает вибрацию движущейся трубы и увеличение количества ложных сигналов. Любые подшипники роликов быстро изнашиваются и люфты, а следовательно, и биение роликов возрастают в процессе длительной эксплуатации установки ультразвукового контроля. Прижимные ролики этих устройств монтируются в каретках, на корпуса которых устанавливаются искатели, что часто приводит к нарушению настройки их акустических осей. При контроле труб сравнительно большого диаметра с этим можно мириться, но при малом диаметре труб и использовании искателей с акустическими линзами это недопустимо.

Представляет интерес ультразвуковой иммерсионный дефектоскоп [8] для контроля тонкостенных труб волнами Лэмба, содержащий искатели, устанавливаемые под заданным углом к поверхности трубы, и держатель ультразвуковых искателей, выполненный в виде полого цилиндра, свободно подвешенного на пружинах в заполненной контактной жидкостью ванне. Цилиндр, через который пропускается контролируемая труба, с обеих сторон снабжен резьбой для навинчивания направляющих втулок, рабочие отверстия которых

(места скольжения трубы) меняются в зависимости от диаметра контролируемой трубы. Направляющие втулки обеспечивают жесткость контролируемого участка трубы и сокращают ее вибрацию, повышая надежность контроля. Однако в этой конструкции сохраняется механический контакт между направляющими втулками, навинчиваемыми на пружинно подвешенный в ванне держатель, и движущейся трубой, приводящий к образованию дефектов на наружной поверхности трубы во время осуществления контроля. Дефекты в виде потертостей и задиrow особенно часто образуются на трубах даже с незначительной кривизной. Спиралевидный след на поверхности появляется на электрополированных и травленых трубах, в частности, из нержавеющей стали, и является браковочным признаком. На трубах из коррозионно-стойких сталей возможно образование задиrow, поскольку вода, используемая в качестве контактной жидкости, не обладает смазывающей способностью.

Кроме того, в случае контроля труб малого диаметра вибрация держателя, неминуемо возникающая при движении и вращении трубы, приводит к нарушению настройки акустических осей искателей. На держателе при контроле труб малого диаметра нельзя устанавливать несколько искателей вдоль оси подачи труб, так как при этом возрастает расстояние между направляющими втулками, и надежность контроля труб малого диаметра даже с небольшой кривизной и разностенностью снижается или становится недопустимой.

В разработанной на ОАО «ПНТЗ» конструкции иммерсионной ванны с держателями для УЗК труб малого диаметра устранены указанные недостатки известных устройств, что в итоге дало возможность надежно контролировать капиллярные трубы диаметром до 2 мм.

Конструктивная схема примененного при контроле труб малого диаметра устройства показана на рис.1.

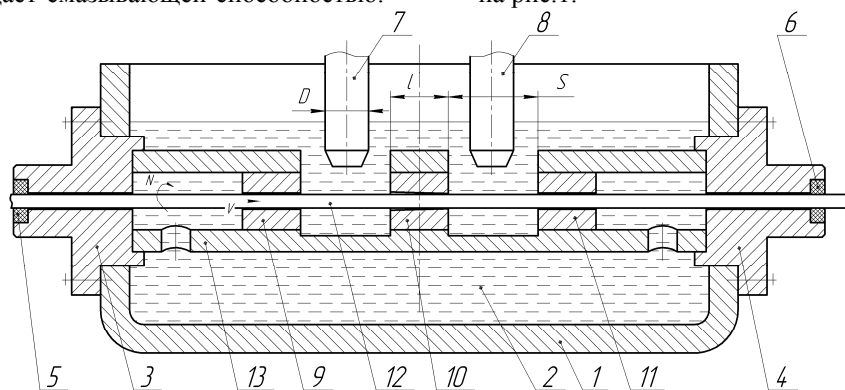


Рис.1. Конструктивная схема устройства УЗК труб малого диаметра

Схематично показанная конструкция устройства содержит иммерсионную ванну 1 с контактной жидкостью (вода) 2, направляющие фланцы 3 и 4, жестко закрепленные по оси подачи трубы на корпусе ванны и снабженные эластичными гидравлическими уплотнениями 5 и 6, предотвращающими утечки контактной жидкости, искатели 7 и 8, закрепленные в регулируемых держателях (на рис.1 не показаны), неподвижно закрепленных относительно корпуса ванны, направляющие втулки 9, 10, 11 длиной l , установленные на расстоянии S друг от друга по оси подачи трубы 12 и жестко закрепленные в кронштейне 13, помещенном в коаксиальные со втулками расточки направляющих фланцев иммерсионной ванны. На рис.1 направляющие втулки 9 и 11 условно изображены с цилиндрическими внутренними каналами, а втулка 10 – со слабokonическим каналом, в котором зазор меняется от h_1 до h_0 в направлении подачи трубы, при этом $h_1 > h_0$.

При работе контролируемая труба 12 подается вдоль оси устройства через отверстия направляющих фланцев 3 и 4 с уплотнениями 5, 6 и через направляющие втулки 9, 10 и 11 до ввода переднего конца трубы в валки привода подачи и вращения (на рис.1 не показаны). Ванна 1

заполняется контактной жидкостью 2 до погружения в нее головок искателей 7 и 8. После включения дефектоскопа запускается привод подачи и вращения трубы. Если все направляющие втулки 9, 10 и 11 являются слабokonическими, то между коническими поверхностями каналов втулок и наружной цилиндрической поверхностью трубы возникает гидродинамический клин, создающий радиальное давление контактной жидкости, под действием которого труба устанавливается по оси каналов направляющих втулок, предотвращая механический контакт трубы и втулок. При установке трубы по оси достигается самоцентрирование трубы относительно акустических осей искателей, настроенных и зафиксированных в держателях таким образом, что ультразвуковые лучи, сфокусированные посредством акустических линз, падают на поверхность трубы под углом в диапазоне от $\alpha_0=10^\circ$ до $\alpha_1=30^\circ$ [2]. Устранение механического контакта между направляющими втулками и трубой позволяет избавиться от вибрации трубы при ее движении и дефектов поверхности.

Гидродинамический клин, создаваемый за счет слабokonических направляющих втулок, позволяет создать в зазоре давление p контактной

жидкости, максимальная величина которого определяется выражением [9]:

$$P_{\max} = \frac{6\mu V l}{k h_0^2} \left[\frac{2+k}{2+2k} \left(1 - \frac{1+k}{2+2k} \right) - \frac{1}{3(2+k)} \right] \quad (1)$$

где μ – динамический коэффициент вязкости, Па·с; если в качестве контактной жидкости используется вода, то при температуре 20°C $\mu = 10,1 \cdot 10^{-4}$ Па·с, а при произвольной температуре μ определяется формулой Пуазейля $\mu = 17,9 \cdot 10^{-4} (1 + 0,0337t + 0,000221t^2)^{-1}$, Па·с;

V – скорость осевой подачи трубы, м/с;

l – длина направляющей втулки, м;

$$k = \frac{h_1 - h_0}{h_0} = \frac{d_1 - d_0}{d_0 - d} \quad \text{– относительное}$$

изменение зазора по длине втулки;

h_1, h_0 – зазоры между направляющей втулкой и трубой, соответственно на входе и на выходе слабоконической втулки, м;

d – наружный диаметр трубы, м;

d_1, d_0 – диаметры канала соответственно на входе и выходе направляющей втулки, м.

Связь между относительным изменением зазора k и стандартной характеристикой относительной конусности η , м/м (изменение диаметра, отнесенное к единице длины конуса)

$$\text{выражается формулой: } \eta = \frac{2k h_0}{l}.$$

Поперечная сила, возникающая при подаче искривленной трубы и достаточная для нарушения ее центровки в направляющей слабоконической втулке, определяется выражением, полученным интегрированием давления p вдоль канала конической направляющей втулки длиной l :

$$P = \frac{6\mu V l^3}{k^2 h_0^2} \left[\ln(1+k) - \frac{2k}{2+k} \right].$$

Если контролируемая труба имеет исходную удельную кривизну ρ , м/м, то сила, необходимая для устранения изгиба при проходе изогнутой части трубы через направляющие втулки 9, 10 и 11 (см. рис.1), равна [10]

$$P_{\text{и}} = \frac{48\rho E J}{(l+S)^2}, \text{ Н,}$$

где E – модуль упругости материала трубы, Па;

J – момент инерции сечения трубы, м⁴;

$2(l+S)$ – расстояние (м) между сечениями приложения равнодействующих давления p крайних направляющих втулок 9 и 11 (см. рис.1). Эта сила приобретает максимальное значение, если участок искривленной трубы при прохождении направляющих втулок подвергается упруго-пластическому изгибу; тогда

$$P_{\text{и}}^{\max} = \frac{\pi \sigma_s d^2 \delta}{l+S},$$

где σ_s – сопротивление пластической деформации материала трубы, Па;

δ – средняя толщина стенки трубы, м.

Минимальная величина зазора h_0 при заданных длине направляющей втулки l и относительном изменении зазора k (или конусности

втулки $\eta = \frac{2k h_0}{l}$ определяется выражением:

$$h_0 = \frac{l(l+S)}{2k} \cdot \sqrt{\frac{\mu V l \left[\ln(1+k) - \frac{2k}{2+k} \right]}{2\rho E J}}.$$

Из расчета следует, что при $l = 15 \dots 25$ мм и $k = 1,1 \dots 0,1$ для нержавеющей тонкостенных труб в диапазоне диаметров $d = 1 \dots 5$ мм зазор может приниматься в диапазоне 0,1...0,3 мм, то есть $d_0 = d + 2h_0 = d + (0,2 \dots 0,6)$ мм. При зазоре более 0,3 мм не обеспечивается центровка трубы, подверженной упруго-пластическому изгибу в направляющих втулках, а при зазоре менее 0,1 мм возникает опасность раздавливания тонкостенной трубы. Конусность каналов направляющих втулок целесообразно выбирать в соответствии с ГОСТ 8593-81. Соответствие между величиной относительного изменения зазора k и конусностью η при $h_0 = 0,1$ мм приведено в таблице.

Таблица. Значения k в зависимости от конусности и длины направляющей

втулки при $h_0 = 0,1$ мм

Конусность η по ГОСТ 8593-81	l , мм			
	10	15	20	25
1:100	0,5	0,75	1,0	1,25
1:200	0,25	0,375	0,5	0,625
1:500	0,1	0,15	0,2	0,25

Для труб сравнительно большого диаметра ($d > 5$ мм) возможна установка направляющих втулок с цилиндрическим каналом, $d_0 = d_1 = 0,1 \dots 0,3$ мм. В этом случае за счет вращения подаваемой трубы с частотой N (практически $N = 4 \dots 5$ с⁻¹) достигается гидродождь трубы в цилиндрическом канале и центрирование её относительно оси подачи. При отсутствии изгиба труба устанавливается точно по оси подачи, т.е. эксцентриситет трубы относительно канала $e \approx 0$. Однако при наличии удельного изгиба трубы для установки трубы как можно ближе к оси подачи необходимо приложить силу гидродождя, которая может быть определена по формуле [9]:

$$P_{\text{г}} = A \frac{3\pi^2 \mu d_0 l N d^2}{h_0^2},$$

где
$$A = \frac{\xi^2}{(2\xi^2 + 1) \cdot \sqrt{\xi^2 - 1}};$$

$\xi = h_0/e$ – относительный эксцентриситет положения трубы в цилиндрическом канале.

При $\xi = 1$ труба касается стенки канала и $P_r = \infty$; при $\xi \rightarrow \infty$ $P_r \rightarrow 0$. Следовательно, при устранении изгиба трубы за счет силы гидродождения точная установка трубы по оси подачи невозможна. Поэтому за счет выбора зазора h_0 и длины втулки l устанавливается допустимое значение эксцентриситета. Из формул сил изгиба трубы [10] и гидродождения определяется коэффициент

$$A = \frac{4\rho E d \delta h_0^2}{\pi(l+S)^2 \mu d_0 l N}, \quad (2)$$

а по графику на рис.2 для найденного A определяется $\xi = h_0/e$ и $e = h_0/\xi$.

Например, для нержавеющей трубы диаметром 5 мм со стенкой $\delta = 0,2$ мм при исходной кривизне трубы $\rho = 0,02$ м/м в случае использования направляющих втулок с $h_0 = 0,2$ мм и $l = 20$ мм гидродождением устраняет изгиб трубы при эксцентриситете $e = 0,02$ мм, что вполне приемлемо для надежного контроля труб. После выбора зазора $h_0 = 0,1 \dots 0,3$ мм длина направляющей втулки определяется последовательными приближениями из равенства (2). При этом целесообразно принять $\xi = 4 \dots 6$, что соответствует назначению остаточного после гидродождения трубы эксцентриситета в диапазоне от 0,025 до 0,05 мм.

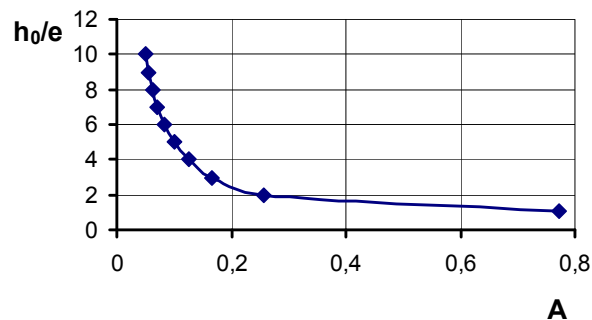


Рис.2. Зависимость относительного эксцентриситета положения трубы в цилиндрическом канале направляющей втулки от коэффициента A

Для осуществления надежного ультразвукового контроля труб малого диаметра, имеющих исходную кривизну ρ , следует устанавливать минимальное расстояние S (см. рис.1) между соседними направляющими втулками, т.е. между торцами втулок 9 и 10, а также – 10 и 11. При подаче и вращении изогнутой трубы она совершает поперечные колебания с амплитудой

$$\Delta b = 2\rho \left(D + 0,5 \frac{V}{N} + l \right).$$

Допустимое поперечное колебание контролируемой трубы в плоскости установки акустического луча искателя определяется способом ультразвукового контроля. При контроле тонкостенных труб волнами Лэмба угол падения луча на поверхность трубы может меняться от $\alpha_0 = 10^\circ$ до $\alpha_1 = 30^\circ$ [2]. На рис.3 схематично показано сечение трубы диаметром d в плоскости установки искателя. Допустимое поперечное колебание трубы $[\Delta b]$ условно представлено боковым допустимым смещением акустического луча. В исходной настройке искателя сфокусированный акустической линзой луч падает на наружную поверхность идеально прямой и аксиально расположенной в направляющих втулках трубы под углом α_0 . В крайних допустимых положениях луч падает под углом α_1 . Из геометрических соотношений можно записать

$$[\Delta b] = \frac{d}{2} [\sin(\alpha_1 + \alpha_0) + \sin(\alpha_1 - \alpha_0)] (1 + \operatorname{tg} \alpha_0) - \cos(\alpha_1 - \alpha_0) \operatorname{tg} \alpha_0.$$

Если согласно рекомендациям [2] $\alpha_0 = 10^\circ$ и $\alpha_1 = 30^\circ$, то $[\Delta b] \approx d/2$. Отсюда может быть определена допустимая исходная удельная кривизна контролируемой трубы

$$[\rho] = \frac{d}{4 \left(D + 0,5 \frac{V}{N} + l \right)}.$$

Минимальное расстояние между торцами смежных направляющих втулок S определяется диаметром головки искателя и зазором на продольное (вдоль

оси трубы) смещение искателя при его настройке, который устанавливается равным половине шага винтовой линии следа акустического луча, т.е. $S = D + 0,5 V/N$. Продольной настройкой искателей достигается максимальное перекрытие поверхности трубы при ее винтовом движении.

Например, при скорости подачи трубы $V = 300$ см/мин = 0,05 м/с, частоте вращения $N = 300$ об/мин = 5 с⁻¹, диаметре головки искателя $D = 15$ мм и длине направляющей втулки $l = 15$ мм

допустимая кривизна трубы диаметром $d = 2$ мм составит $[\rho] = 0,0143 \text{ м/м} = 14,3 \text{ мм/м}$.

При переходе на другой диаметр контролируемых труб производится замена направляющих фланцев 3 и 6 и направляющих втулок 9, 10 и 11 (см. рис.1). Поскольку при

движении трубы отсутствует механический контакт между трубой и направляющими втулками, втулки имеют высокую износостойкость, а на трубе не образуется новых дефектов при проведении испытаний.

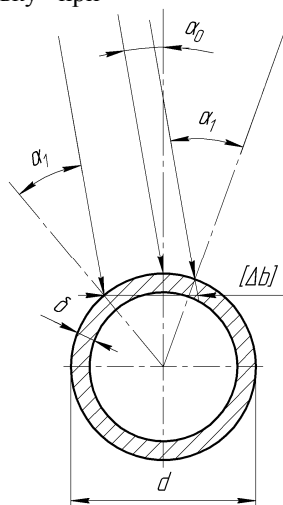


Рис. 3. Схема к расчету допустимого поперечного колебания трубы в плоскости акустического луча

Разработанная конструкция устройства для УЗК труб малого диаметра реализована в одном из цехов ОАО «ПНТЗ» и установлена на дефектоскопе марки УДТ-4М. В настоящее время контроль капиллярных труб $2,3 \times 0,3$ мм из коррозионно-стойкого сплава ЧС-116 по ТУ 14-159-264-97, используемых для оболочек тепловыделяющих элементов атомных реакторов, и труб $2,0 \times 0,2$ мм из стали 12Х18Н10Т-ВД с требованиями по ТУ 14-ЗР-1560-2008 для теплообменных аппаратов авиационной техники проводится в технологическом потоке. На капиллярных трубах удается определять дефекты типа продольных поверхностных трещин,

расслоений от раскатанных неметаллических включений и металлических закатов на наружной поверхности труб. Примеры обнаруживаемых дефектов на наружной поверхности труб $2,0 \times 0,2$ мм показаны на рис. 4-6. На рис.4 показана электронно-микроскопическая фотография обнаруженного дефекта типа продольной поверхностной трещины длиной 0,6 мм и шириной 0,05 мм. Такая трещина не обнаруживается при визуальном контроле и при использовании штатных устройств иммерсионной ванны дефектоскопа.

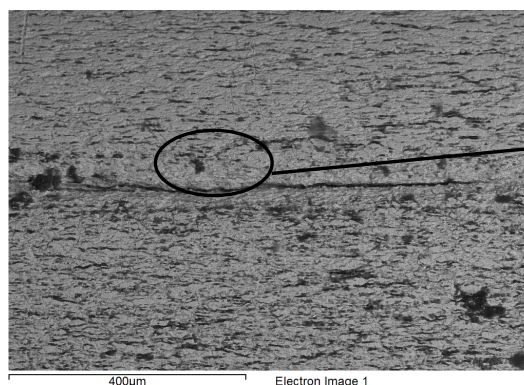
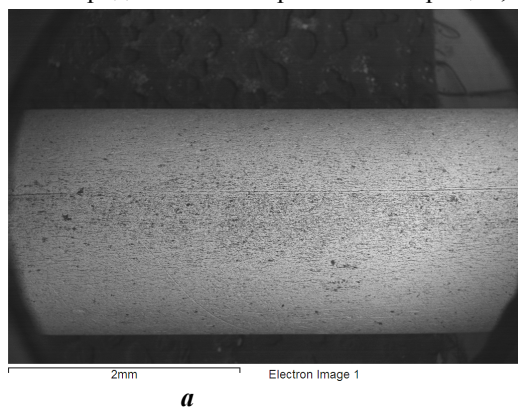


Рис.4. Внешний вид трубы (а) $2,0 \times 0,2$ мм из коррозионно-стойкой стали и увеличенный вид обнаруженного дефекта типа прибыльной поверхностной трещины (б)

Неметаллические включения металлургического происхождения в процессе холодной прокатки и последующего волочения вытягиваются вдоль образующей стенки трубы. Материал включения при интенсивной пластической деформации разрушается и выкрашивается, образуя продольную риску, которая во многих случаях рассматривается как браковочный признак для

капиллярных труб указанного типоразмера. За счет стабилизации оси трубы с помощью описанного устройства удастся обнаруживать такого вида дефекты. На рис.5 показаны примеры подобных обнаруженных при УЗК дефектов.

К трудноопределимым на капиллярных трубах дефектам относятся вдавленные в поверхность частицы металла, являющиеся

продуктом разрушения деформирующего инструмента. Часто подобные дефекты возникают при разрушении мостиков сварки материалов трубы и валков при прокатке или трубы и волок. Визуально эти дефекты обнаружить практически невозможно. На рис.6 показаны подобные идентифицированные

при УЗК дефекты. Несмотря на малый размер этих дефектов они являются источниками питтинговой коррозии нержавеющей труб, работающих даже в слабоагрессивных средах.

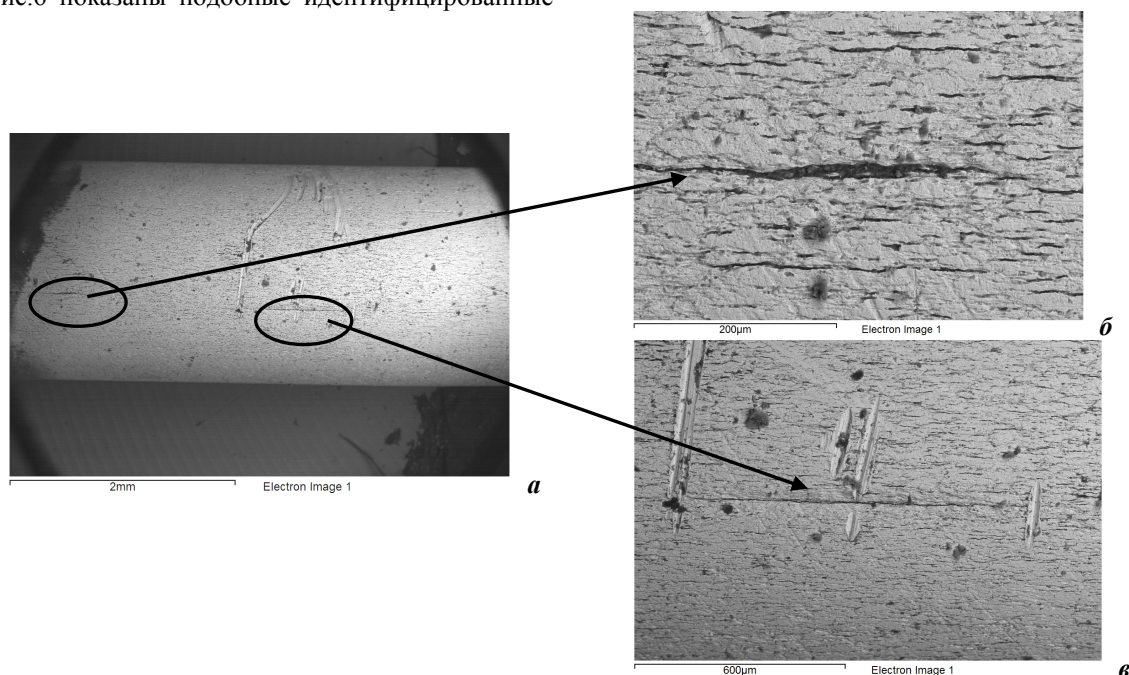


Рис.5. Вид обнаруженных на трубе 2,0×0,2 мм дефектов, возникающих при выкрашивании неметаллических включений: *а* – внешний вид трубы и положение дефектов; *б* – дефект длиной 0,3 мм и шириной 0,03 мм; *в* – дефект длиной 0,7 мм и шириной 0,02 мм

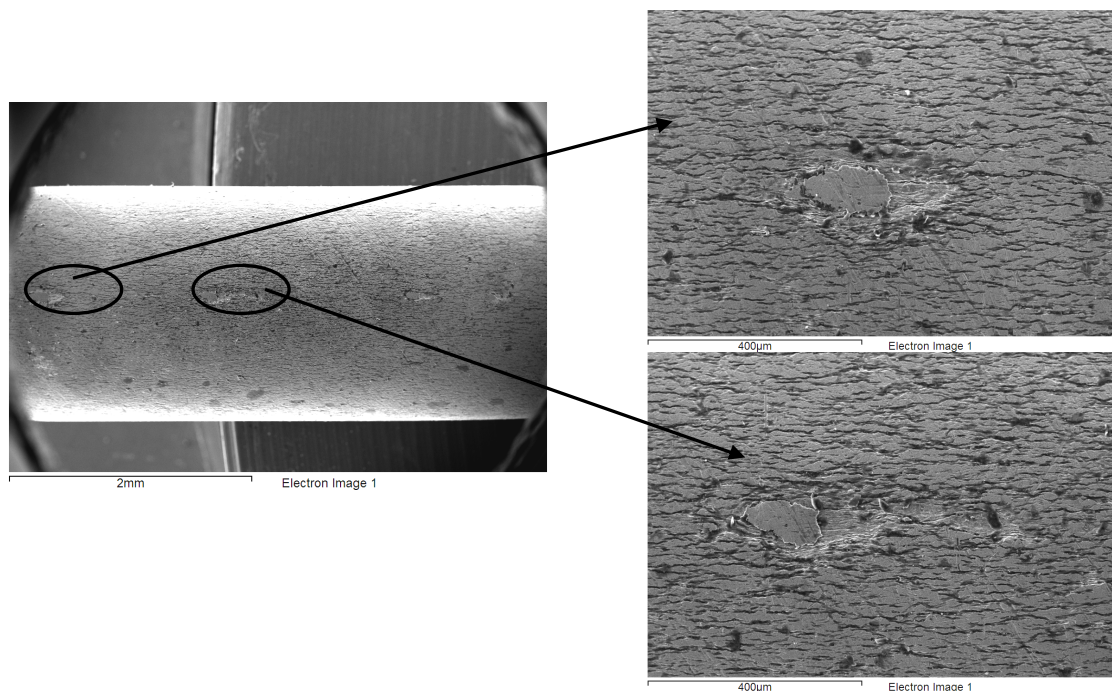


Рис.6. Вид дефектов, обнаруживаемых на поверхности капиллярных труб и являющихся закатанными мелкими частицами металлов либо трубы, либо деформирующего инструмента

Все три показанных на рис.6 дефекта предположительно имеют одну природу. Обнаружение таких дефектов возможно за счет отражения акустических лучей от краев вдавленной частицы металла. Поэтому эти дефекты нельзя рассматривать как расслоения, параллельные

поверхности трубы. Средний размер обнаруженных дефектов составляет 0,2-0,1 мм.

Таким образом, разработанное и внедренное в производство устройство для УЗК капиллярных труб позволяет достаточно простым средством, используя физические свойства контактной

жидкости, повысить качество контроля труб и расширить технические возможности дефектоскопа, реализующего ультразвуковой контроль иммерсионным методом, за счет надежного контроля труб малого диаметра.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1.Крауткремер И., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов. М.:Металлургия, 1991. 340 с.
- 2.Неразурушающие испытания. Справочник /Под ред. Р.Мак-Мастера. М.: Энергия. Кн.2. 1965. 492 с.
- 3.А.с. СССР №329463 от 17.04.1970.
- 4.SU 1714488 A1, 03.02.1987.
- 5.RU 2044315 C1, 15.06.1992.
- 6.RU 2132054 C1, 31.07.1998.
- 7.RU 2248568 C1,29.10.3002.
- 8.А.с. СССР №180392 от 12.04.1963.
- 9.Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика. М.: Машиностроение, 1987. С.308-317.
- 10.Справочник металлста /Под ред. С.А. Чернавского и В.Ф. Резчикова. Т.1. М.: Машиностроение, 1976. С.201-213.